

SFCR: Conceptos Generales

Oscar Perpiñán Lamigueiro

Universidad Politécnica de Madrid

① Sistemas Fotovoltaicos de Conexión a Red

② Inversor de CR

① Sistemas Fotovoltaicos de Conexión a Red

Definición

Mecanismos de Retribución

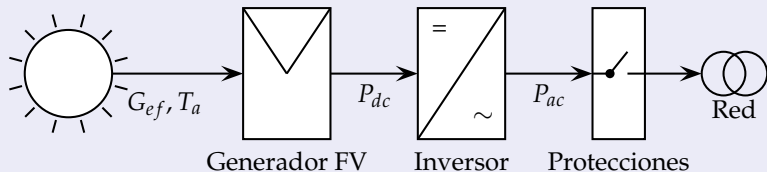
SFCR en suelo y en edificación

Condiciones técnicas de la conexión

② Inversor de CR

Definición de un SFCR

Un Sistema Fotovoltaico Conectado a la Red (SFCR) es un sistema cuya función es producir energía eléctrica en condiciones adecuadas para poder ser inyectada en la red convencional.



① Sistemas Fotovoltaicos de Conexión a Red

Definición

Mecanismos de Retribución

SFCR en suelo y en edificación

Condiciones técnicas de la conexión

② Inversor de CR

Mecanismos de retribución

- ▶ La energía producida por este sistema será consumida parcial o totalmente en las cercanías, y la energía sobrante será inyectada en la red para su distribución a otros puntos de consumo.
- ▶ Mecanismos de retribución
 - ▶ Prima (*Feed-in tariff*)
 - ▶ Balance neto (*Net-metering*)

Retribución con prima

- ▶ **Ingresos** por la **energía total producida** (independientemente de la que haya sido consumida en las cercanías del SFCR).
- ▶ El diseño **no necesita considerar un consumo** a satisfacer.
- ▶ **Objetivo**: producción anual del sistema sea la máxima posible sin tomar en consideración los consumos cercanos.

Balance neto

- ▶ **Compensa los saldos de energía eléctrica** entre el SFCR y un sistema de consumo asociado.
- ▶ Cuando la producción del SFCR supera al consumo, la red eléctrica absorbe el excedente puntual, generándose derechos de consumo diferido.
- ▶ Estos derechos de consumo se pueden ejercer cuando la producción del SFCR no es suficiente para satisfacer el consumo asociado.
- ▶ El **diseño debe incluir el consumo asociado** como una *variable adicional* que condicionará el tamaño del generador fotovoltaico.

① Sistemas Fotovoltaicos de Conexión a Red

Definición

Mecanismos de Retribución

SFCR en suelo y en edificación

Condiciones técnicas de la conexión

② Inversor de CR

Características distintivas sobre suelo y en edificación

▶ **Sobre suelo**

- ▶ Sistemas estáticos, con una inclinación y orientación fija
- ▶ Sistemas de seguimiento, que varían la posición del generador a lo largo del día y año para maximizar la radiación efectiva incidente

▶ **Sobre edificación**, según el grado de integración

- ▶ General
- ▶ Superposición de módulos: colocación paralela a la envolvente del edificio
- ▶ Integración arquitectónica: doble función energética y arquitectónica; sustituyen elementos constructivos convencionales o son elementos constituyentes de la composición arquitectónica

SFCR sobre suelo

- ▶ **Objetivo:** maximizar la producción energética anual del sistema con el menor coste y la menor ocupación de terreno posibles
- ▶ El diseñador debe decidir el tamaño del generador teniendo en cuenta:
 - ▶ Inversión económica (relacionada principalmente con la potencia del generador)
 - ▶ Rendimiento económico deseado (relacionado con la energía producida por el sistema y, por tanto, con el modo de seguimiento empleado)
 - ▶ Ocupación de terreno (relacionado con el modo de seguimiento empleado).

Estructuras sobre suelo



SFCR sobre suelo: seguimiento

- ▶ **Fundamento:**

- ▶ Radiación incidente aumenta al seguir al sol
 - ▶ Pérdidas por reflexión disminuyen si el apuntamiento al sol mejora
- ▶ Las diferentes técnicas de seguimiento son un compromiso entre un apuntamiento perfecto y sistemas estructurales más económicos y mejores aprovechamientos del terreno.

SFCR sobre suelo: seguimiento

▶ Doble eje

- ▶ Apuntamiento «perfecto»
- ▶ Mejor productividad, peor ocupación de terreno.

▶ Seguimiento acimutal

- ▶ Sacrifica un movimiento (inclinación del generador) para conseguir sistemas más económicos.

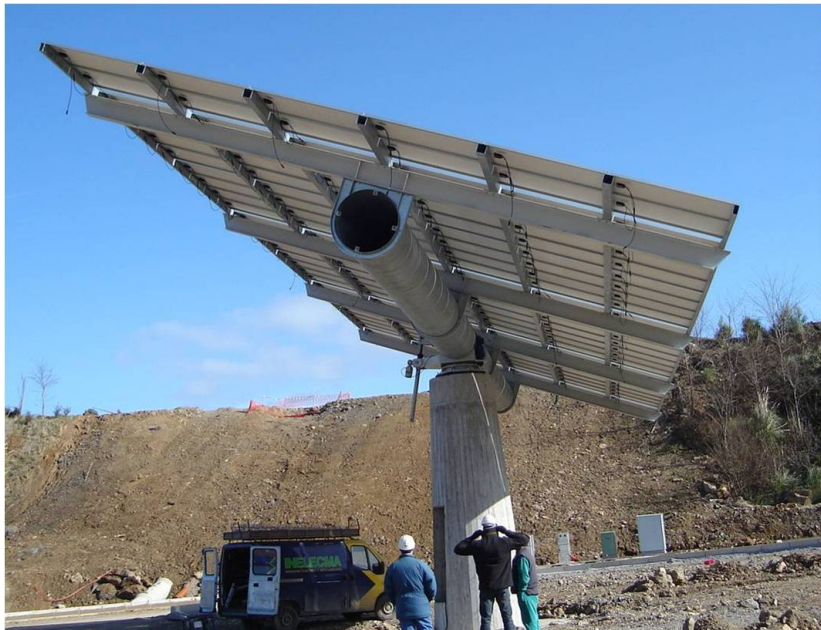
▶ Seguimiento horizontal con eje Norte-Sur

- ▶ Sencillez y estabilidad estructural (el eje es horizontal y paralelo al terreno, con tantos puntos de apoyo como se consideren necesarios),
- ▶ Facilidad de motorización,
- ▶ Buen aprovechamiento del terreno.

Seguidor de eje horizontal N-S



Seguidor de doble eje



SFCR en edificación

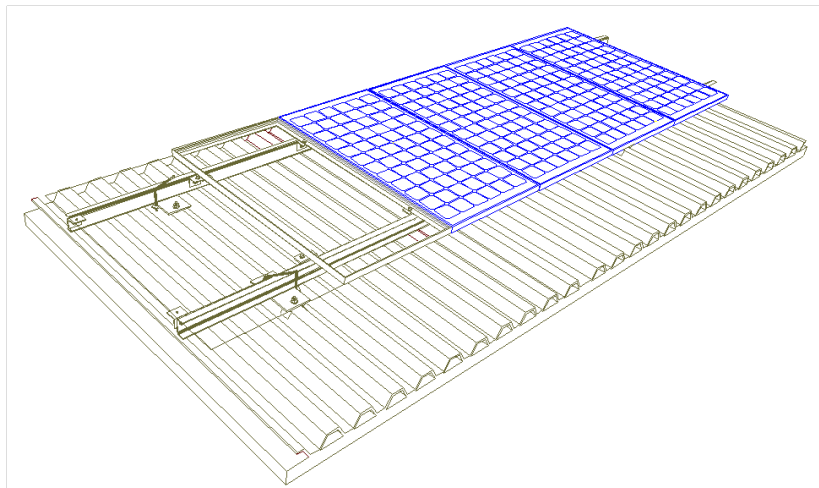
- ▶ La integración del sistema fotovoltaico con el edificio exige tener en cuenta muchos factores que condicionan la ubicación y la configuración del generador.
- ▶ El diseñador debe tomar las decisiones oportunas para **aprovechar las sinergias entre edificio y sistema fotovoltaico**, reduciendo las posibles interferencias entre uno y otro.

Integración arquitectónica

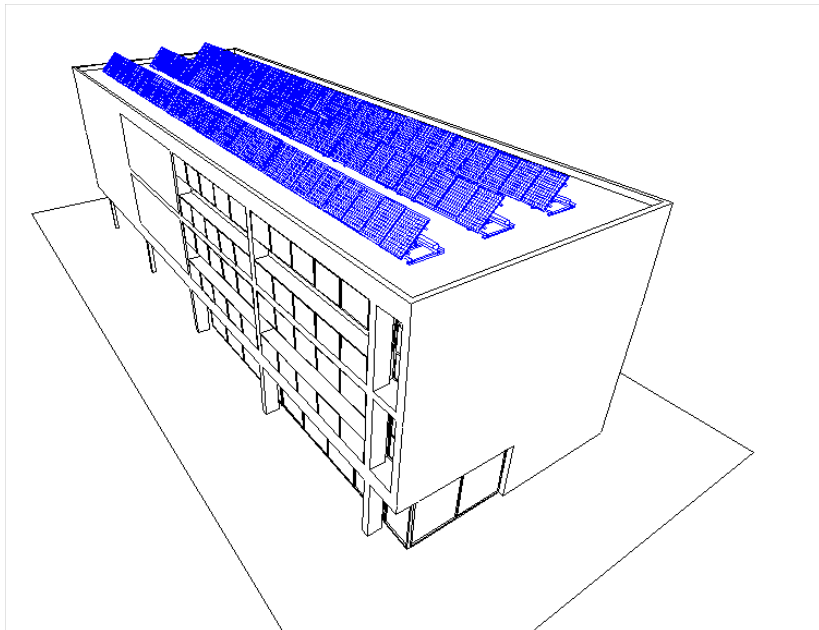
- ▶ Cubierta Inclinada
- ▶ Cubierta Plana
- ▶ Parasol
- ▶ Fachada Acristalada
- ▶ Muro Cortina
- ▶ Aparcamiento
- ▶ ...

<http://www.pvdatabase.org/>

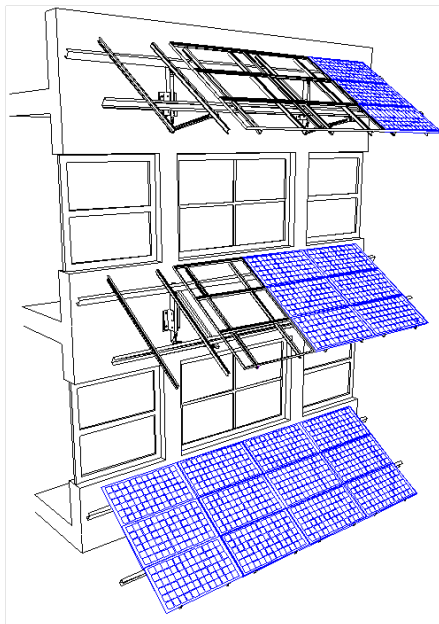
Cubierta Inclinada



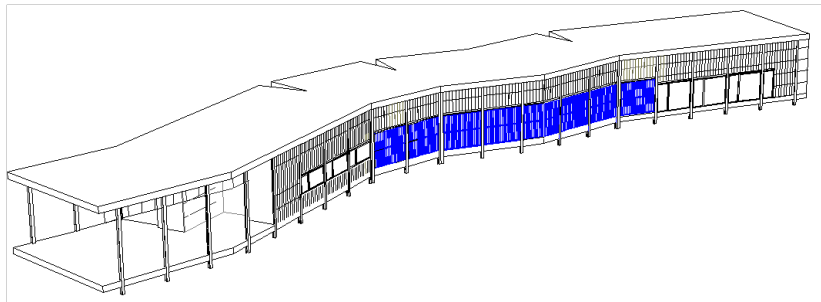
Cubierta Plana



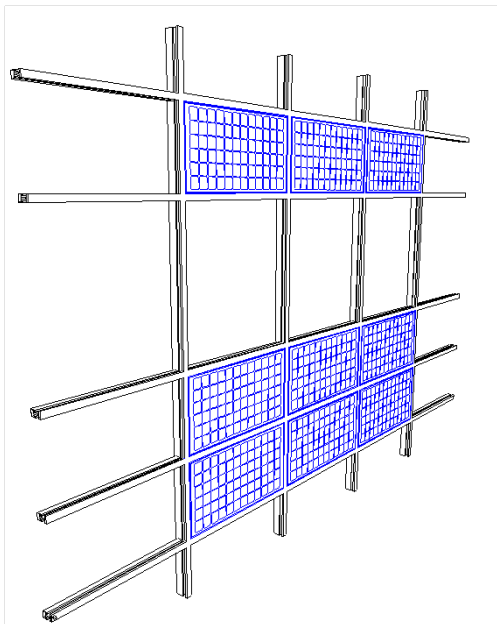
Parasol



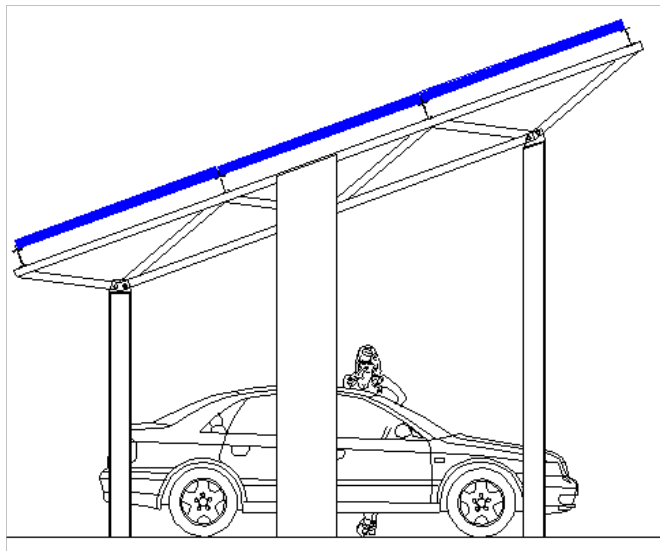
Fachada Acristalada



Muro Cortina



Aparcamiento



SFCR en edificación: CTE-HE5

- ▶ El CTE-HTE5 divide España en cinco zonas climáticas de acuerdo al valor medio anual de la radiación global diaria en el plano horizontal.
- ▶ Por ejemplo, toda la cornisa cantábrica está encuadrada en la zona I (radiación inferior a $3,8 \text{ kW h m}^{-2}$) mientras que Canarias y parte de Andalucía pertenecen a la zona V (radiación superior a 5 kW h m^{-2}).
- ▶ Este Código aboga por instalar mayor potencia en las zonas con mayor radiación.

- ▶ Potencia **nominal** a instalar

$$P_{min} = C \cdot (0,002 \cdot S - 5)$$

- ▶ Esta potencia debe ser inferior a 100 kW.
- ▶ $C = 1$ para zona climática I, $C = 1,4$ para zona climática V.
- ▶ Aplica sólo cuando $S > 5000 \text{ m}^2$.

① Sistemas Fotovoltaicos de Conexión a Red

Definición

Mecanismos de Retribución

SFCR en suelo y en edificación

Condiciones técnicas de la conexión

② Inversor de CR

SFCR en Edificación: sistemas eléctricos

- ▶ En este tipo de SFCR el diseño de los sistemas eléctricos debe tener en cuenta las canalizaciones previstas o existentes en el edificio.
- ▶ Por facilidad de instalación y mantenimiento, y por seguridad de los sistemas, es recomendable el uso de canalizaciones separadas del resto de sistemas del edificio.
- ▶ Sin embargo, los criterios de seguridad eléctrica aconsejan utilizar una **red de tierras común** para el edificio y el sistema fotovoltaico.

Separación entre comercialización y generación

- ▶ La reglamentación eléctrica española establece la separación administrativa entre la comercialización y la distribución de la energía (así, la empresa que nos vende energía eléctrica en nuestro hogar es distinta a la que compra la energía que produce el sistema que podemos tener en nuestro tejado).

Autoconsumo

Las condiciones técnicas de conexión a la red eléctrica de los sistemas de autoconsumo en España se detallan:

- ▶ Guía Técnica de Aplicación del REBT: Instalaciones Generadoras de Baja Tensión (ITC-BT-40).
- ▶ Anexo III (Modos de Conexión) de la Guía Profesional del Autoconsumo del IDAE.

En estos documentos se recopila el catálogo de posibilidades según:

- ▶ tipo de autoconsumo (individual o colectivo)
- ▶ tipo de conexión (en red interior o a través de red).

① Sistemas Fotovoltaicos de Conexión a Red

② Inversor de CR

① Sistemas Fotovoltaicos de Conexión a Red

② Inversor de CR

Conceptos Generales

Tipos de Inversores

Características básicas

Composición

Funcionamiento

Islanding

Acoplamiento a la red

La potencia suministrada por un generador fotovoltaico iluminado es de tensión continua, que debe ser adecuadamente acondicionada para permitir el funcionamiento correcto de las cargas conectadas en un sistema autónomo o el acoplamiento a la red eléctrica en el caso de sistemas de conexión a red.

Definición

- ▶ El equipo de acondicionamiento de potencia, denominado inversor DC/AC, realiza la **conversión de continua a alterna cumpliendo con determinados requisitos** de tensión eficaz, frecuencia, distorsión armónica de las ondas de tensión y corriente, rendimiento instantáneo y medio, seguridad eléctrica, etc.
- ▶ Funciona como fuente de corriente autoconmutada y sincronizada con la red.

① Sistemas Fotovoltaicos de Conexión a Red

② Inversor de CR

Conceptos Generales

Tipos de Inversores

Características básicas

Composición

Funcionamiento

Islanding

Tipos de inversores

A grandes rasgos, los inversores pueden agruparse en tres categorías:

- ▶ **Inversor central**: un único inversor dedicado a todo el generador (o a un conjunto de ramas)
- ▶ **Inversor orientado a rama** (*string-inverter*): un inversor dedicado a una rama del generador.
- ▶ **Módulo-AC**: un inversor dedicado a un módulo del generador.

Inversores de Rama

- ▶ Los **inversores orientados a rama** son particularmente útiles en algunos sistemas de integración arquitectónica, al poder adaptarse mejor a las condiciones de funcionamiento con orientaciones e inclinaciones diversas.
- ▶ Los inversores **módulo-AC** deben descartarse en cualquier caso (salvo pequeños sistemas demostrativos).

Inversores Centrales

- ▶ Los **inversores centrales** son recomendables para instalaciones de medio o gran tamaño. Permiten reducir costes (de adquisición, instalación y mantenimiento) y aumentar fiabilidad y eficiencia.
- ▶ **La potencia del inversor debe estar en consonancia con la potencia del generador** (una planta de 1 MWp debiera contar con 10 inversores de 100 kW o 4 de 250 kW, pero no con 200 de 5 kW).

① Sistemas Fotovoltaicos de Conexión a Red

② Inversor de CR

Conceptos Generales

Tipos de Inversores

Características básicas

Composición

Funcionamiento

Islanding

Potencia y ventana MPP

- ▶ **Potencia nominal y máxima**, siendo ésta un porcentaje de sobrecarga que el equipo es capaz de soportar durante un determinado período de tiempo (indicado por el fabricante).
- ▶ **Ventana de búsqueda del Punto de Máxima Potencia** (MPP en siglas inglesas): es el rango de tensiones en las que el inversor aplica un algoritmo de búsqueda del MPP del generador fotovoltaico.

Tensiones

- ▶ **Tensión máxima de entrada:** es la máxima tensión que el inversor puede aguantar sin sufrir una avería.
- ▶ **Tensión nominal de salida:** es la tensión de red a la que se puede conectar el inversor (habitualmente 230 Vac para equipos monofásicos y 400 Vac para equipos trifásicos).
- ▶ **Umbral de arranque:** según las unidades en las que se expresa, puede indicar la radiación solar incidente en el generador (W m^{-2}) o la potencia de entrada (W) necesaria para que el inversor comience el proceso de conversión.

Eficiencia y Rendimiento

- ▶ **Eficiencia máxima:** máximo valor que toma la relación entre potencia de salida y potencia de entrada. En inversores de calidad la eficiencia es estable en un amplio rango de funcionamiento del equipo y de un valor cercano a la eficiencia máxima.
- ▶ **Rendimiento europeo:** es la relación entre la energía entregada por un inversor que recibe una energía producida por un generador fotovoltaico funcionando en unas condiciones de radiación características de la zona centroeuropea.

① Sistemas Fotovoltaicos de Conexión a Red

② Inversor de CR

Conceptos Generales

Tipos de Inversores

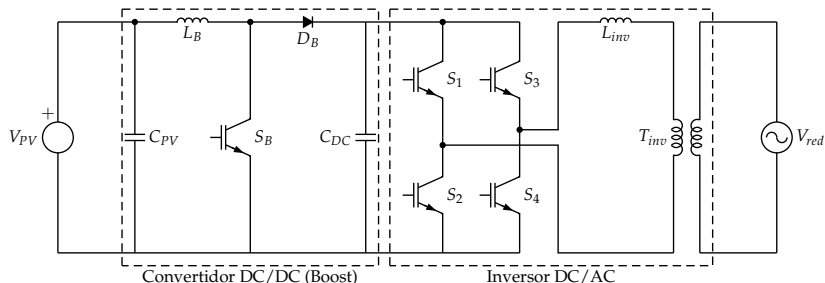
Características básicas

Composición

Funcionamiento

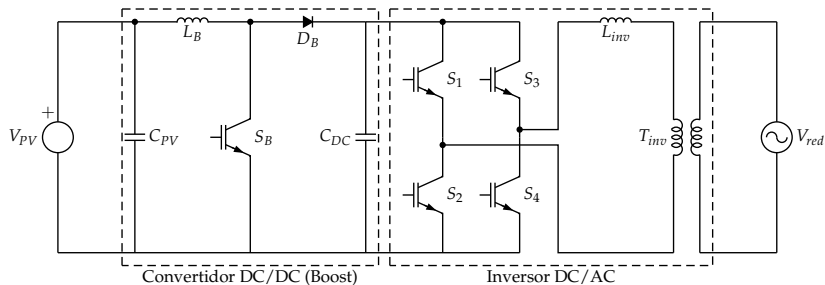
Islanding

Entrada

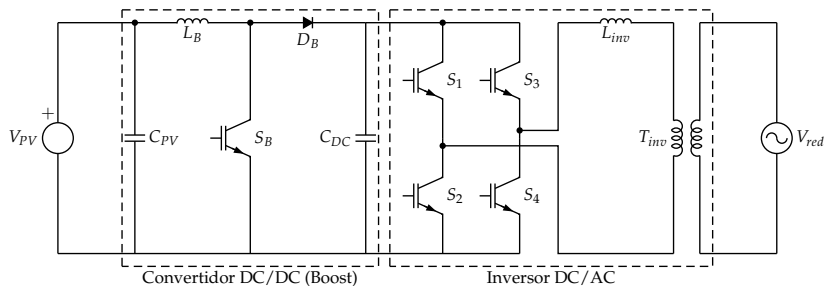


- ▶ **Filtro de entrada:** atenúa el rizado que produce la conmutación en la corriente de entrada
- ▶ **Convertidor DC/DC:** adecúa (eleva o reduce) la tensión de salida del generador a la tensión necesaria para el puente de conmutación. Puede realizar las funciones de búsqueda del punto de máxima potencia.

Puente y salida



- ▶ **Puente inversor:** realiza el troceado de la señal continua para convertirla en alterna
- ▶ **Filtro de salida:** elimina o atenúa los armónicos no deseados
- ▶ **Transformador:** adecua el valor de tensión de salida del puente al de la red y proporciona aislamiento galvánico entre la parte DC y AC.



- **Control:** realiza la supervisión de la entrada y salida del convertidor DC/DC y del puente inversor y entrega las consignas correspondientes para localizar y seguir el MPP del generador, y para obtener una señal sinusoidal con bajo contenido en armónicos en la salida del inversor.

① Sistemas Fotovoltaicos de Conexión a Red

② Inversor de CR

Conceptos Generales

Tipos de Inversores

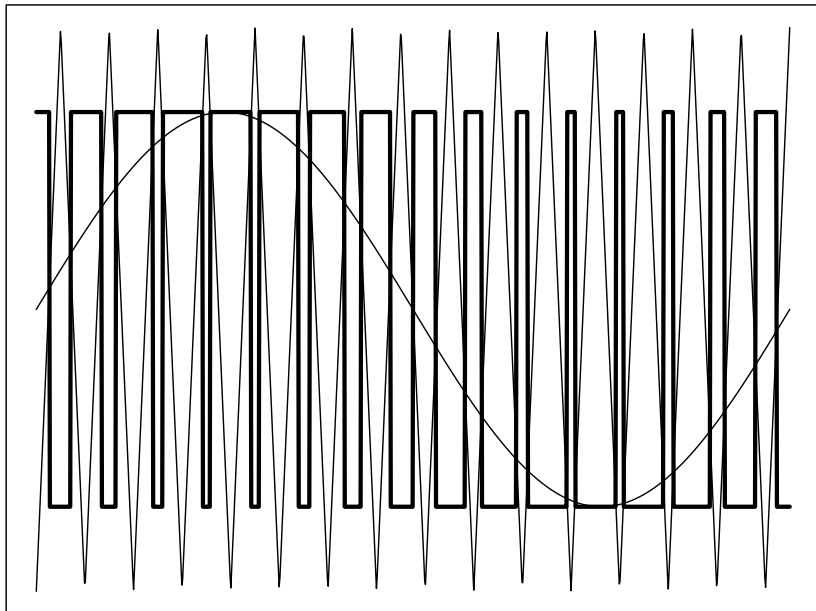
Características básicas

Composición

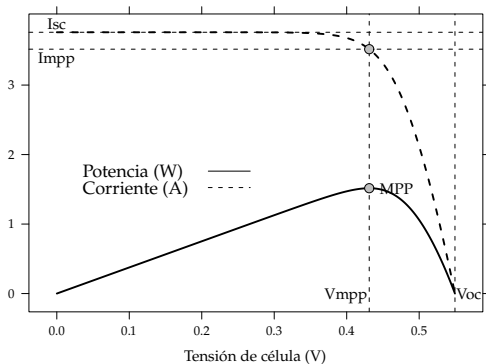
Funcionamiento

Islanding

Modulación SPWM

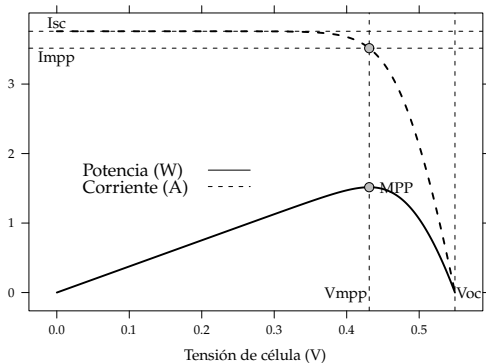


Busqueda del Punto de Máxima Potencia



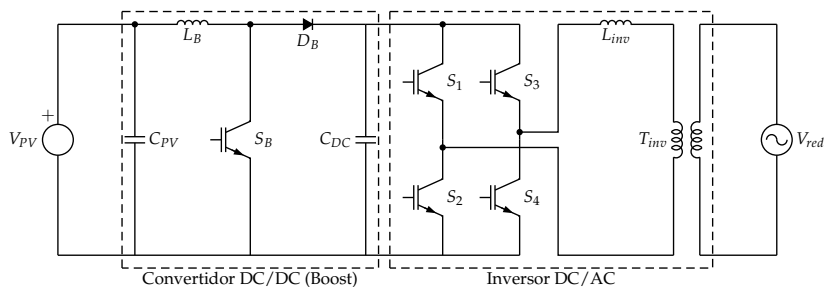
$$\begin{cases} \frac{dP}{dV} > 0 & 0 < V < V_{mpp} \\ \frac{dP}{dV} = 0 & V = V_{mpp} \\ \frac{dP}{dV} < 0 & V_{mpp} < V < V_{oc} \end{cases}$$

Busqueda del Punto de Máxima Potencia



$$\begin{cases} \frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V} & 0 < V < V_{mpp} \\ \frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} & V = V_{mpp} \\ \frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V} & V_{mpp} < V < V_{oc} \end{cases}$$

Transformador de salida



- ▶ El transformador permite adecuar el nivel de tensión de salida del puente de conmutación a la tensión de red.
- ▶ La componente inductiva del transformador es parte del filtro de salida y sirve como acoplamiento entre la red eléctrica y la salida del inversor.
- ▶ Establece el aislamiento galvánico entre la entrada del inversor (DC) y la salida (AC).

Opciones comerciales

Existen tres opciones en el mercado de inversores de conexión a red:

- ▶ Inversores con transformador de salida en baja frecuencia
- ▶ Inversores sin transformador
- ▶ Inversores con transformador de alta frecuencia

Normativa relativa al transformador

La normativa vigente en España obliga al uso de un transformador de aislamiento o elemento equivalente para cumplir tres objetivos:

- 1 Aislar la instalación generadora para evitar la transferencia de defectos entre la red y la instalación
- 2 Proporcionar seguridad personal
- 3 Evitar la inyección de corriente continua en la red.

Normativa: Nota de Interpretación Técnica

- ▶ Objetivos 1 y 2 se consiguen mediante la adecuada conexión de masas y tierras en el sistema.
- ▶ Objetivo 3: «**la corriente continua inyectada en la red de distribución por una instalación generadora no será superior al 0,5 % de la corriente nominal de la misma**», cumplido «**cuando se disponga en la instalación de un transformador separador entre el inversor y el punto de conexión de la red de distribución**». *Los inversores con transformador de alta frecuencia o sin transformador deben demostrar el cumplimiento de este requisito mediante un ensayo descrito en esta nota.*

① Sistemas Fotovoltaicos de Conexión a Red

② Inversor de CR

Conceptos Generales

Tipos de Inversores

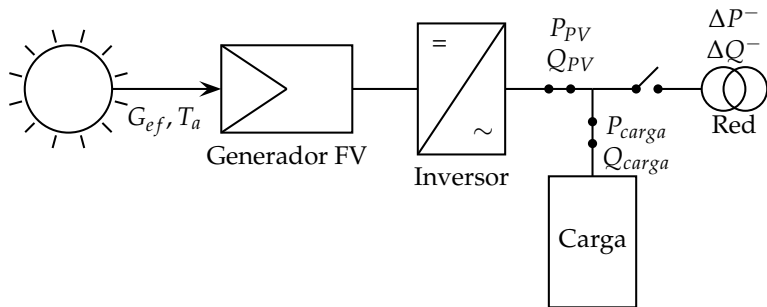
Características básicas

Composición

Funcionamiento

Islanding

Definición del problema



Ecuaciones básicas

Antes de la desconexión:

$$\Delta P = P_{carga} - P_{PV}$$

$$\Delta Q = Q_{carga} - Q_{PV} \simeq Q_{carga}$$

siendo:

$$P_{carga} = \frac{V^2}{R_{carga}}$$

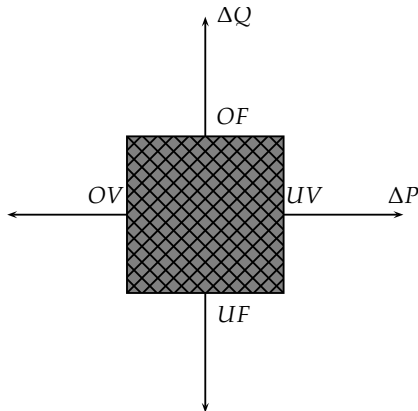
$$Q_{carga} = \frac{V^2}{\omega L} - V^2 \omega C$$

Casos posibles

- ▶ $\Delta P^- > 0 \rightarrow P_{carga} > P_{PV}$. Al producirse la desconexión, dado que P_{PV} no cambia, disminuye la potencia entregada a la carga, y por tanto baja la tensión.
- ▶ $\Delta P^- < 0 \rightarrow P_{carga} < P_{PV}$. Al producirse la desconexión, aumenta la potencia entregada a la carga, y por tanto sube la tensión.
- ▶ $\Delta Q^- > 0 \rightarrow Q_{carga} > 0$. La carga es inductiva. Al producirse la desconexión, dado que el generador FV no entrega reactiva, la reactiva debe tender a 0, y por tanto aumenta la frecuencia.
- ▶ $\Delta Q^- < 0 \rightarrow Q_{carga} < 0$. La carga es capacitiva. La reactiva debe tender a cero, y por tanto disminuye la frecuencia.

Ventana de no-detección

Cuando las condiciones de trabajo del generador y el consumo antes de la desconexión son muy cercanas, existe una ventana de no-detección.



Estudio experimental IEA-PVPS

- ▶ La probabilidad de que se de una situación de balance entre consumo y generación en una red de Baja Tensión está entre 1×10^{-5} y 1×10^{-6} .
- ▶ Para que se de una situación de isla, este balance debe coincidir con una desconexión de la red: la probabilidad de ocurrencia simultánea de estos dos sucesos es virtualmente nula.

Estudio experimental IEA-PVPS

- ▶ El riesgo eléctrico existente en cualquier red eléctrica es del orden de 1×10^{-6} .
- ▶ Este estudio mostró que el riesgo de accidente eléctrico asociado a un sistema fotovoltaico funcionando en isla bajo los escenarios de mayor penetración fotovoltaica era inferior a 1×10^{-9} .
- ▶ Este resultado indica que el riesgo asociado al accidente eléctrico por isla FV no incrementa el riesgo que ya existe en las instalaciones eléctricas.